

УДК 621.376.2

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЭТАЛОНА ЕДИНИЦЫ ДЕВИАЦИИ ЧАСТОТЫ

А.В. МЫЛЬНИКОВФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево Московская обл.,
lab203@vniiftri.ru

В статье приводятся результаты исследований возможностей методов и средств измерений с целью усовершенствования Государственного первичного специального эталона единицы девиации частоты. Доказана возможность и необходимость применения прямого цифрового синтеза в первичном эталоне единицы девиации частоты. Точность измерений подтверждена четырьмя независимыми методами измерений, для которых расхождение не превысило 0,024%. Диапазон несущих частот расширен в 7 раз. Диапазон значений девиации частоты расширен вверх в 10 раз с сохранением точности измерений.

This paper deals with the research results of possible methods and means of measurements with the aim of improving the State Primary Special Standard of the unit of deviation frequency. The possibility and necessity of the direct digital synthesis application in the Primary Standard of the unit of the frequency deviation were proved. The measuring accuracy was confirmed by four independent measuring methods for which the deviation did not exceed 0.024%. The range of the carrier frequency was extended by seven times. The range of the carrier frequency was extended up by ten times maintaining the accuracy of measurements.

Ключевые слова: девиация частоты, первичный эталон, частотно-моделируемые сигналы, измерители модуляции, систематическая погрешность, усовершенствование

Процесс создания эталонной базы в области измерений девиации частоты имеет свою историю. В 1976 г. в СССР был введен в действие Государственный специальный эталон единицы девиации частоты ГЭТ 105-76 и ГОСТ 8.232-77 на поверочную схему. Данный первичный эталон разрабатывался и хранился в г. Харькове, где была создана школа ученых-метрологов во главе с П.А. Шпаньоном и Ю.Ф. Павленко. Другая школа специалистов действовала в г. Нижнем Новгороде (г. Горьком), где разрабатывались средства измерения девиации частоты, в частности, рабочие эталоны – установки К2-38, которыми было оснащено большинство региональных центров стандартизации и метрологии.

После распада СССР эталон единицы девиации частоты ГЭТ 105-76 продолжал действовать на территории Украины, где в 1992 г. на его базе был создан новый первичный эталон единицы девиации частоты. Однако для должного централизованного воспроизведения размера единицы девиации частоты требовались межгосударственные перевозки эталонных средств измерений, что в 90-е годы реализовано не было.

Поэтому из-за отсутствия доступного высшего звена поверочной схемы в России возникла угроза утраты единства измерений. Актуальным стал вопрос проведения сличения действующих рабочих эталонов, эксплуатируемых в различных регионах страны [1]. К 2002 году в Нижнем Новгороде под руководством Ю.Д. Болмусова были созданы образцы установок РЭДЧ-1[2], с помощью которых стало возможным проведение сличения рабочих эталонов.

Сличения показали, что после 10–15 лет эксплуатации сходимость результатов воспроизведения пикового значения девиации частоты установками К2-38 находятся в пределах допускаемой погрешности, указанных в эксплуатационной документации. Именно на основе установки РЭДЧ-1 позже был создан Государственный первичный эталон единицы девиации частоты [3]. Как и у его предшественников, принцип действия эталона заключается в использовании линейного частотно-модулированного (ЧМ) генератора и метода электронно-счетного частотомера. В качестве ЧМ генератора применен LC-генератор, у которого емкость (варикап) изменяется синусоидальным модулирующим напряжением. В режиме калибровки модулирующее напряжение подбирают таким образом, чтобы девиация частоты (максимальное отклонение частоты от среднего значения за период модулирующего напряжения) была равна 1000 кГц. Для этого используют преобразователь частоты на низкую промежуточную частоту (10–30 кГц) и электронно-счетный частотомер, который измеряет среднее значение промежуточной частоты за длительный период времени, – намного больше периода модулирующего сигнала. Результатом измерения периодически изменяющегося от 0 до 1000 кГц значения частоты в случае строго синусоидального модулирующего напряжения и линейной модуляции является интеграл от синуса на интервале от 0 до $\pi/2$. То есть при калибровке частотомер должен регистрировать значение $(2/\pi) \cdot 1000 \text{ кГц} \approx 636,62 \text{ кГц}$. В этом случае можно утверждать, что ЧМ генератор воспроизводит точное значение девиации частоты 1000 кГц.

Все остальные значения девиации (от 10 Гц до 1000 кГц) получают путем деления модулирующего напряжения в соответствующее число раз.

Утвержденный в 2004 г. Государственный первичный специальный эталон девиации частоты позволяет воспроизводить девиацию частоты на двух несущих частотах 5 и 50 МГц. Его модулирующий генератор имеет 11 фиксированных частот от 20 Гц до 200 кГц. Предусмотрена возможность работы от внешнего модулирующего генератора в этом же диапазоне частот.

Размер единицы частоты – герц передают от Государственного первичного эталона единиц времени и частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1-2012.

Эталон ГЭТ 166-2004 обеспечивает воспроизведение единицы девиации частоты со средним квадратическим отклонением результатов измерений S_0 , не превышающим $2 \cdot 10^{-4}$ при десяти независимых наблюдениях. Неисключенная систематическая погрешность Θ не должна быть более определяемой по формуле:

$$\Theta = \Theta_M + \Theta_a, \quad (1)$$

где Θ_M – мультипликативная составляющая неисключенной систематической погрешности;

Θ_a – аддитивная составляющая неисключенной систематической погрешности.

Значения Θ_M и Θ_a в зависимости от характеристик воспроизводимых частотно-модулированных сигналов указаны в табл. 1.

Таблица 1

Δf , кГц	F_m , кГц	$\Theta_M = (0,5 \dots 1,5) \times 10^{-3} \Delta f$, Гц	$\Theta_a = (1 \dots 150)$, Гц	$\Theta = \Theta_M + \Theta_a = (6 \dots 1150)$, Гц
10...1000	0,02...20,00	$0,5 \cdot 10^{-3} \Delta f$	20	25...520
	20...200	$1 \cdot 10^{-3} \Delta f$	150	160...1150
0,01...10,00	0,02...20,00	$1 \cdot 10^{-3} \Delta f$	20	20...30
	20...200	$1,5 \cdot 10^{-3} \Delta f$	150	150...165
10...100	0,3...3,0	$0,5 \cdot 10^{-3} \Delta f$	1	6...51

На момент создания ГЭТ 166 находился на уровне лучших мировых аналогов по своим метрологическим характеристикам. За текущий год было поверено на действующем эталоне ГЭТ 166-2004 более 100 рабочих эталонов, и это число с каждым годом увеличивается.

Однако за последнее время наметился значительный прогресс в области средств измерения параметров частотно-модулированных сигналов. Только за последние пять лет было добавлено в Госреестр 38 новых типов средств измерений девиации частоты.

В России взамен устаревших образцовых установок К2-38, К2-56 и измерителя модуляции СКЗ-45 разработаны и выпускаются эталонные поверочные установки К2-85 и РЭЕДЧ-1 и измерители модуляции СКЗ-49, СКЗ-49/1 СКЗ-50, СКЗ-50/1. За рубежом парк СИ параметров ЧМ сигналов пополняется, как правило, анализаторами спектра и приемниками с опциями измерения девиации частоты и нелинейных искажений (FM distortion).

Часть из новых средств измерений параметров ЧМ сигналов приведена в табл. 2.

Таблица 2

Тип СИ	Несущая частота f_0 , МГц	Диапазон значений Δf , кГц	Пределы допускаемой погрешности		
			Δ_m , %	Δ_a , Гц в полосе	
				3 кГц	200 кГц
РЭДЧ-1	0,1; 1; 2; 5; 50	от 0,01 до 1000	0,2	0,9-9	120
Г4-219	от 10-6 до 100	от 0,001 до 100	0,2	46*	450
К2-85	0,1; 1; 2; 5; 50; 250; 500; 1000	от 0,01 до 1000	от 0,3 до 0,4	1,2-160	180
К2-96/1	от 0,01 до 6,5; 5; 50	от 0,1 до 1000	0,2	0,6-6	30-90
СКЗ-50/1	от 0,05 до 4400	от 0,1 до 1000	от 0,5 до 1,5	от 0,6 до 6	40-800
SMBV-AM-FM	10; 50	от 5 до 1000	от 0,3 до 0,4	2	600
FSW-K7	от 10* до 26000	до 5000 (40000)	от 0,3 до 0,6	15*	(42-600)*
ESPI-K7	до 7000	до 5000 (40000)	от 0,3 до 0,6	5	200*
E4440A	от 0,1 до 50000	от 0,25 до 400	от 1,0 до 8,5	от 4,5 до 36	от 36* до 290*
FSMR26	от 10 до 26500	от 0,01 до 5000	от 1,0 до 3,0	от 0,4* до 4,5*	от 3 до 41
Fluke 9640A	от 9 до 4000	от 0,01 до 750 (4800 $f_0 = 4000$)	3,0 (тип. 0,25)	0,2	3,5
SPN9003A	от 0,25 до 3600	от 0,01 до 1000	0,3	4*	30
N9030A	от 0,25 до 50000	от 0,01 до 10000	1,0	20	

где: Δ_m , Δ_a – мультипликативная и аддитивная составляющие погрешности.

Современные тенденции в развитии средств измерений девиации частоты – это многофункциональность, повышение точности, расширение диапазонов, развитие технологий, основанных на цифровом синтезе и цифровом анализе сигнала. Цифровой синтез, например, использован в генераторах Г4-219, Г4-220, SMB100A,C (на частотах до 23 МГц) 81150A, 81160A, AWG 70000 и др.

Цифровой анализ применен в анализаторах сигналов (N9020A, N9030A, SPN9003A), анализаторах спектра (E4440A, FSV, FSW), измерительных приемниках (FSMR, ESPI), осциллографах (WR104Xi, WR635Zi). Общий принцип построения анализаторов сигналов – преобразование на промежуточную частоту, оцифровка быстродействующим АЦП и анализ цифрового массива данных математическими методами.

В области измерения девиации частоты отмечаются расширение диапазона несущих частот (до 18 ГГц и выше), расширение диапазона модулирующих частот (до 1 МГц), расширение диапазона значений девиации частоты.

Сложилась реальная ситуация, когда неисключенная систематическая погрешность действующего эталона препятствует дальнейшему увеличению точности средств измерений девиации частоты. В табл. 3 выделены эти средства измерений.

Таблица 3

Тип СИ	$\Delta_m, \%$	$\Delta_a, \text{ Гц}$ В полосе от 0,3 до 3 кГц	$\Delta_a, \text{ Гц}$ В полосе от 0,3 до 200 кГц
РЭЕДЧ-1	0,2	9	120
РЭЕДЧ-2	От 0,15 до 0,2	6	90
К2-96/1	От 0,15 до 0,2	6	45
Fluke 9640A	3,0 (тип. 0,25)	0,2	3,5 (Данные изготовителя)

Аналогична ситуация с диапазонами несущих частот и измеряемых значений. В табл. 4 выделены средства измерений, превосходящие по своим диапазонам действующий эталон.

Поэтому актуальной задачей стало исследование возможностей улучшения метрологических характеристик действующего эталона ГЭТ 166-2004, а именно, уменьшение неисключенной систематической погрешности эталона и расширение диапазона несущих частот.

Таблица 4

Тип СИ	Частота $f_0, \text{ МГц}$	Диапазон значений $\Delta f, \text{ кГц}$
СКЗ-50/1	От 0,05 до 4400	От 0,1 до 1000
FSW26- K7	От 10* до 26000	До 5000 (40000)
SPN9003A	От 0,25 до 3600	До 10000
SPN9026A	От 0,25 до 26000	До 10000
К2-96/1	0,1; 1; 5; 10; 50; 100; 250; 500; 1000; 2000; 4000	От 0,1 до 1000 До 20000, $f_0 = 4 \text{ ГГц}$
Fluke 9640A	от 9 до 4000	от 0,01 до 750 До 4800, $f_0 = 4 \text{ ГГц}$

Анализ частных составляющих неисключенной систематической погрешности первичного эталона проводился неоднократно метрологами из Харьковского НИИ метрологии, разработчиками из Нижнего Новгорода и метрологами ФГУП «ВНИИФТРИ» [3]. Доминирующей составляющей является коэффициент гармоник модулирующей частоты. Возникает он, в основном, из-за нелинейности ЧМ генератора. Именно нелинейность модуляционной характеристики ЧМ генератора ограничивает верхнее значение девиации, воспроизводимой эталоном – 1000 кГц. Принцип действия первичных эталонов и рабочих эталонов единицы девиации частоты (РЭЕДЧ-1, РЭЕДЧ-2,

К2-96, К2-85, К2-56, К2-38) основан на применении ЧМ генератора, имеющего LC-генератор, в котором используется управляемая модулирующим напряжением емкость C – варикап. Ограниченные возможности электрически управляемой емкости не позволяют уменьшить нелинейность модуляционной характеристики ЧМ генератора, а также ограничивают верхнее значение девиации, воспроизводимой эталоном.

Одним из альтернативных решений является замена LC-генератора на цифровой ЧМ генератор, действующий на основе прямого цифрового синтеза (Direct digital syntheses – DDS). Попытки применить цифровой синтез для формирования ЧМ сигнала предпринимались неоднократно. В частности, характеристики одного из российских генераторов сигналов – Г4-219 гарантируют на несущей частоте 100 МГц девиацию 1 Гц с погрешностью 0,2 %. Разработчиков и метрологов не смутил такой факт, что паразитная девиация частоты, нормированная в документации, составляет от 10 до 20 Гц. Фактически она оказалась в 15 раз выше. Именно наличие частотных шумов не позволяет реализовать воспроизведение девиации частоты с погрешностью $\pm 0,2$ % ни в одной точке диапазона значений девиации частоты (от 1 Гц до 100 кГц).

Быстродействие и разрядность современных цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП) год от года увеличиваются, что дает основания для оптимистических прогнозов в данной области техники.

Тем не менее, для успешной реализации прямого цифрового синтеза в эталонных средствах измерения девиации частоты потребовались многолетние усилия. В течение нескольких последних лет на Государственном первичном специальном эталоне единицы девиации частоты ГЭТ 166-2004 исследовались метрологические характеристики высокочастотных генераторов на основе прямого цифрового синтеза [4]. Из нескольких десятков высокочастотных генераторов, поступавших в нашу лабораторию, особого внимания заслуживали генераторы SMB100A, SMBV100A фирмы «Rohde & Schwarz» и генератор 81160A фирмы «Keysight technologies». Рассматривалась возможность применения данных генераторов в качестве эталонных средств измерений девиации частоты. Передача размера единицы девиации частоты осуществляется на нескольких стандартных несущих частотах, наиболее часто используют несущую частоту 50 МГц. Генератор SMB100A использует прямой цифровой синтез только до 23,4 МГц, т.к. содержит ЦАП с частотой дискретизации 200 МГц. Этот генератор воспроизводит ЧМ сигнал и на более высоких несущих частотах, однако при этом его метрологические характеристики заметно ухудшаются.

Генераторы SMBV100A имеют режим векторной модуляции, что, как показали проведенные испытания, позволяет использовать их как рабочие эталоны 1 разряда при передаче размера единицы девиации частоты (несущая частота 50 МГц). Они также используются и для передачи размера единицы коэффициента амплитудной модуляции [5]. Заметным ограничением является наличие шума из-за дискретности формирования сигнала: при полосе пропускания демодулированного сигнала 200 кГц пиковое значение шума составляет около 600 Гц.

Прямой цифровой синтез применен в генераторе сложной/произвольной формы 81160A, изготавливаемом фирмой «Keysight technologies». Генератор 81160A имеет 14-разрядный ЦАП с частотой дискретизации 2,5 ГГц и может воспроизводить сигналы с несущей частотой до 500 МГц. Характеристики именно этого генератора исследовались наиболее подробно. В частности, исследовался коэффициент гармоник, который характеризует линейность преобразования модулирующего сигнала в девиацию частоты. Исследования коэффициента гармоник (Total harmonic distortion - «THD») ЧМ сигнала генератора 81160A с помощью анализатора сигналов FSW8-K7 показали, что гармоники совсем незначительны, а результат измерений во многом обусловлен собственным коэффициентом гармоник анализатора сигналов, который гарантирует коэффициент гармоник менее 0,1 % (THD менее минус 60 дБ) при девиации частоты не более 500 кГц. Результаты измерений коэффициента гармоник приведены в таблице 5.

Таблица 5

F _m , кГц	THD, дБ при девиации Δf, кГц				
	10000	1000	500	100	10
1,0	-89,1	-89,3	-89,5	-89,7	-78,5
20	-81,8	-90,2	-88,3	-95,2	-80,2
60	-79,5	-85,5	-81,0	-83,2	-72,5
100	-75,2	-77,9	-80,7	-94,3	-73,6
200	-69,3	-74,6	-78,9	-94,1	-69,0

Согласно таблице, на всех модулирующих частотах наблюдается некоторое увеличение коэффициента гармоник при малых значениях девиации частоты (10 кГц), что легко объяснить увеличением относительного значения шумовой составляющей анализируемого сигнала. В любом случае измеренное значение коэффициента гармоник не превысило минус 69 дБ (около 0,03 %), что существенно лучше показателей аналоговых ЧМ генераторов, которые имеют значение коэффициента гармоник до 0,15 % в диапазоне модулирующих частот от 100 до 200 кГц при девиации частоты 1000 кГц.

Введение в состав действующего эталона ГЭТ 166-2004 генератора 81160А позволит снизить нелинейность модуляционной характеристики ЧМ генератора и таким образом уменьшить доминирующую составляющую не-исключенной систематической погрешности.

В отличие от аналоговых средств воспроизведения ЧМ сигнала прямой цифровой синтез обладает следующими преимуществами:

- независимый метод воспроизведения, опирающийся только на частоту дискретизации (внутренний опорный генератор), не требующий калибровки девиации частоты;
- возможность воспроизведения значений девиаций частоты вплоть до значения несущей частоты;
- возможность расширения диапазона модулирующих частот;
- отсутствие погрешности делителя напряжения и сниженная погрешность из-за нелинейности характеристики модулятора.

Введение в состав действующего эталона ГЭТ 166-2004 генератора 81160А позволит воспроизводить девиацию частоты на любой несущей частоте в диапазоне от 10 кГц до 250 МГц.

С уменьшением воспроизводимого значения девиации частоты дискретность ЦАП генератора увеличивает влияние на погрешность воспроизведения. Это регистрируется средствами измерений девиации частоты как повышенный уровень шума. Особенно увеличены шумы при максимальной полосе пропускания демодулированного сигнала (200 кГц). Логично предположить, что уровень этого частотного шума уменьшается с увеличением амплитуды (мощности) выходного сигнала генератора. Это и было установлено экспериментально. На компараторе Государственного первичного специального эталона единицы девиации частоты ГЭТ 166-2004 производилось сравнение частотного шума генератора 81160А и калибратора эталона. Для защиты компаратора от перегрузки и выравнивания амплитуд сигналов к выходу генератора подключался внешний аттенюатор 16-20 дБ. При максимальном выходном уровне сигнала генератора частотные шумы практически не отличались от шумов калибратора эталона (пиковое значение девиации частоты, регистрируемое эталонным компаратором, составило около 100 Гц при полосе пропускания 200 кГц).

При дальнейшем исследовании шумов генератора обнаружилось, что на модулирующей частоте 1 кГц не удастся установить девиацию частоты менее 20 Гц. Расчетный уровень шумов при полосе 3 кГц должен быть менее 20 Гц, а шумы эталонного компаратора должны быть существенно ниже.

Анализатор сигналов FSW8-K7 показал наличие паразитного прохождения синусоидального сигнала с частотой модуляции. Причем такое прохождение сигнала имеет место и на других модулирующих частотах, но на частоте 1 кГц оно максимально. Вид экрана анализатора сигналов (режим аналогового демодулятора) представлен на рис. 1.

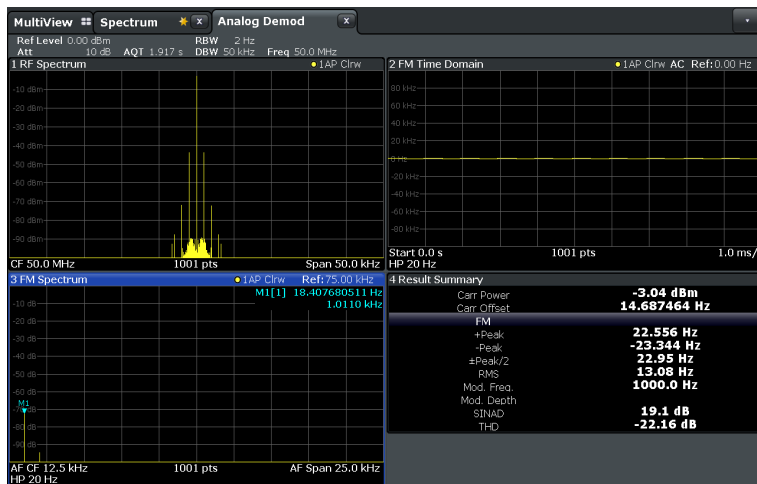


Рис. 1. Иллюстрация паразитного прохождения модулирующего сигнала

В эксперименте установленное значение девиации генератора составляло значение 1 мкГц, а в спектре демодулированного сигнала (экран «FM Spectrum») курсор M1 регистрирует девиацию равную 18,4 Гц. Уровень шумов при этом невелик – суммарное значение девиации (экран «Result Summary») регистрируется от 22 до 23 Гц. Из изложенного вытекают ограничения на применение генератора 81160А в качестве эталонного калибратора – значение погрешности Θ_a не может быть менее 20 Гц, или требуется вносить поправки на каждой из модулирующих частот.

Поэтому для уменьшения данной составляющей погрешности в составе эталона используется прежний, аналоговый калибратор, который имеет уровень шумов менее 15 Гц в полосе от 0,3 до 20 кГц и менее 6 Гц в полосе 0,3 до 3,4 кГц.

Расширение диапазона несущих частот свыше 250 МГц обеспечивает калибратор частотной и фазовой модуляции К2-96/1. Уровень шумов у него не превышает 6 Гц при полосе 3 кГц и 45 Гц при полосе 200 кГц. В калибраторе использован прежний, аналоговый генератор ЧМ сигнала и умножители частоты для воспроизведения фиксированных несущих частот 500 МГц, 1,0; 2,0 и 4,0 ГГц. Пропорционально возрастает максимальное воспроизводимое значение девиации, а также уровень шумовой составляющей, которая в худшем случае при полосе 200 кГц и несущей частоте 4 ГГц не превышает 3 кГц.

Расширение диапазона модулирующих частот от 10 Гц до 1 МГц с возможностью установки любой произвольной частоты в этом диапазоне также обеспечивает калибратор частотной и фазовой модуляции К2-96/1. Он имеет встроенный генератор модулирующего напряжения с малым коэффициентом гармоник. Этот генератор позволяет также модулировать при необходимости калибратор действующего эталона.

В настоящее время исследованы и могут быть включены в состав усовершенствованного эталона ГЭТ 166-2004 три калибратора девиации частоты: действующий эталонный калибратор, генератор сложной/произвольной формы 81160А и калибратор частотной и фазовой модуляции К2-96/1.

Установление размера единицы девиации частоты ранее производилось тремя методами [3]. Действующий эталонный калибратор перед каждым воспроизведением размера единицы калибруется методом электронно-счетного частотомера, который, в свою очередь, откалиброван на Государственном первичном эталоне времени и частоты и национальной шкалы времени ГЭТ 1-2012. Таким образом размер единицы – герц передают от Государственного первичного эталона единиц времени и частоты.

Кроме того, для повышения достоверности установленного размера единицы и внесения некоторых поправок применяют метод «нулей функции Бесселя» и метод измерения экстремальных значений периода ЧМ сигнала [3]. Введение в состав эталона генератора 81160А добавляет четвертый независимый метод установления размера единицы девиации частоты.

Хотя все четыре применяемых метода измерения (воспроизведения) девиации частоты достаточно универсальны, однако диапазоны воспроизводимых значений, диапазоны несущих и модулирующих частот для разрабатываемого эталона настолько велики, что не могут быть полностью охвачены любым из указанных методов. Границы диапазонов точных методов измерения условно обозначены на рис. 2.

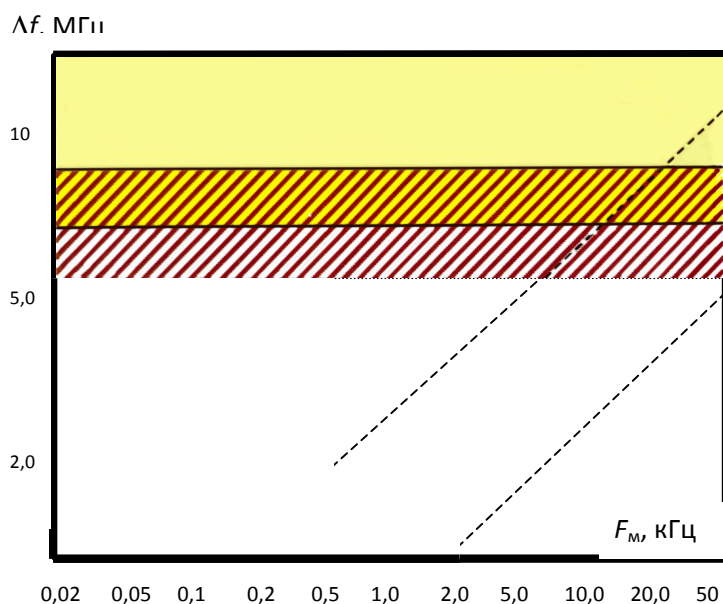


Рис. 2. Границы применимости методов измерения

Как показали проведенные в рамках настоящей работы исследования, наибольшим диапазоном воспроизводимых значений и диапазонами несущих и модулирующих частот обладает метод прямого цифрового синтеза (метод DDS). Он позволяет воспроизводить значения единицы девиации частоты от единиц килогерц до 10 (и более) МГц во всем диапазоне модулирующих частот и практически на любой несущей частоте в пределах диапазона частот генератора.

Метод электронно-счетного частотомера позволяет измерять (вычислять) девиацию частоты от нескольких сотен килогерц до 2 МГц во всем диапазоне модулирующих частот на одной несущей частоте (50 МГц). На рис. 2 область применимости метода заштрихована красным цветом. При малых значениях девиации частоты заметно возрастает погрешность метода, при значениях более 2 МГц возникают две проблемы. Первое, аналоговый генератор эталонного калибратора перегружается, и возникающие нелинейные искажения приводят к значительной погрешности измерения. Второе, полоса пропускания преобразователя частоты эталонного калибратора ограничена, что приводит к сбоям счета частотомера.

Область применимости метода экстремальных значений девиации частоты обозначена желтым цветом. Выше 10 МГц область применимости не рассматривалась и может быть расширена. Ниже значений девиации частоты 1 МГц погрешность метода заметно возрастает и его применимость в эталоне регрессирует.

Границы применимости метода «нулей функции Бесселя» обозначены на рис. 2 пунктирными линиями. Особенностью метода «нулей функции Бесселя» является возможность определения девиации частоты только в некоторых точках, если задана модулирующая частота $\Delta f \approx 2,4, \dots, 30$ Гм. То есть область применения выглядит в виде параллельных линий от одной до другой пунктирной линии на рис. 2.

Следует отметить, что применимость метода «нулей функции Бесселя» для аналоговых генераторов меньше из-за их нестабильности. За время настройки на точное значение модулирующей частоты изменяется значение несущей частоты, что мешает оператору отследить момент минимальной амплитуды несущей частоты. Поэтому измерить данным методом значения девиации менее 1 кГц весьма проблематично. Применение стабильных генераторов DDS существенно расширяет диапазон метода.

Существенным ограничением точности метода «нулей функции Бесселя» является влияние на смещение нулей функции Бесселя наличие гармоник модулирующей частоты и сопутствующая амплитудная модуляция (СПАМ). Это влияние достаточно подробно рассмотрено в [2], обнаруживается при экспериментальных исследованиях. Аналоговые генераторы ЧМ сигналов

имеют СПАМ порядка 2 % и коэффициент гармоник на высоких модулирующих частотах около 0,1 %, что приводит к заметным ограничениям погрешности измерения девиации частоты методом «нулей функции Бесселя». Поэтому при метрологических исследованиях характеристик действующего эталона приходилось проводить измерения для нескольких нулей. Результаты с большими расхождениями от результатов измерений методом электронно-счетного частотомера отбрасывались, а с малыми расхождениями усреднялись.

Ситуация изменилась коренным образом с применением генераторов прямого цифрового синтеза. В их сигнале коэффициент гармоник и СПАМ на порядок ниже, чем в аналоговых генераторах ЧМ сигнала, поэтому смещение нулей функции Бесселя остается практически незамеченным, и результаты измерений для каждого из нулей отличаются в пределах случайной погрешности измерения. Погрешность измерения методом «нулей функции Бесселя» с применением генераторов прямого цифрового синтеза может быть существенно снижена по сравнению с оценкой, данной в [2].

Методика определения погрешности первичного эталона ГЭТ 166-2004 методом «нулей функции Бесселя» дана в руководстве по эксплуатации на действующий эталон. При этом в качестве генератора, воспроизводящего единицу девиации частоты, следует использовать генератор 81160А. Он позволяет не только точно устанавливать значение модулирующей частоты, но и очень плавно регулировать девиацию частоты Δ .

Результаты определения погрешности воспроизведения девиации частоты генератором 81160А из состава экспериментального образца методом «нулей функции Бесселя» представлены в табл. 6.

Таблица 6

Мод. частота F_m , кГц	20	60	100	200	500
Девиация Δf , кГц	361,510	331,138	552,012	1731,121	2760,61
Погрешность, %	0,024	0,021	0,00036	0,022	0,020

Из результатов экспериментальных данных, представленных в табл. 6, видно, что установление размера единицы девиации частоты двумя методами (метод «нулей функции Бесселя» и метод прямого цифрового синтеза) совпадает с разницей (0,02,..0,024) %. Причем результаты сходятся и за пределами рабочего диапазона частот – на модулирующей частоте 500 кГц.

Метод экстремальных значений периода ЧМ сигнала реализуется в действующем первичном эталоне с помощью многократных измерений электронно-счетным частотомером. Временное разрешение применяемого частотомера составляет 10^{-9} – 10^{-12} с, что существенно ограничивает возможности метода.

Анализ современных быстродействующих аналого-цифровых преобразователей (АЦП) показывает, что временное разрешение в них достигается $\sim 10^{-13} - 10^{-12}$ с, что существенно выше, чем у применяемого частотомера, но еще на два порядка не достигает требований, сформулированных в [3] и реализуемых в действующем эталоне. Именно поэтому область применимости метода экстремальных значений периода ЧМ сигнала на рис. 2 ограничивается значениями девиации частоты от 1 до 10 МГц и в этой области метод используют для установления размера единицы девиации частоты. В исследованиях был применен цифровой запоминающий осциллограф WR625Zi, имеющий АЦП с частотой дискретизации 40 ГГц и программное обеспечение, позволяющее реализовать временное разрешение 10^{-13} с. Полоса пропускания осциллографа 2,5 ГГц.

Для диапазона модулирующих частот от 20 Гц до 30 кГц целесообразно измерять минимальные периоды преобразованного на низкую промежуточную частоту ЧМ сигнала. Для этого несущая частота 50 МГц (период ЧМ сигнала порядка 20 нс) преобразовывается на промежуточную частоту порядка 10 кГц, при этом минимальный период ЧМ импульсов будет составлять порядка 1 мкс при девиации частоты 1 МГц [3]. Блок-схема для измерения девиации на промежуточной частоте представлена на рис. 3.

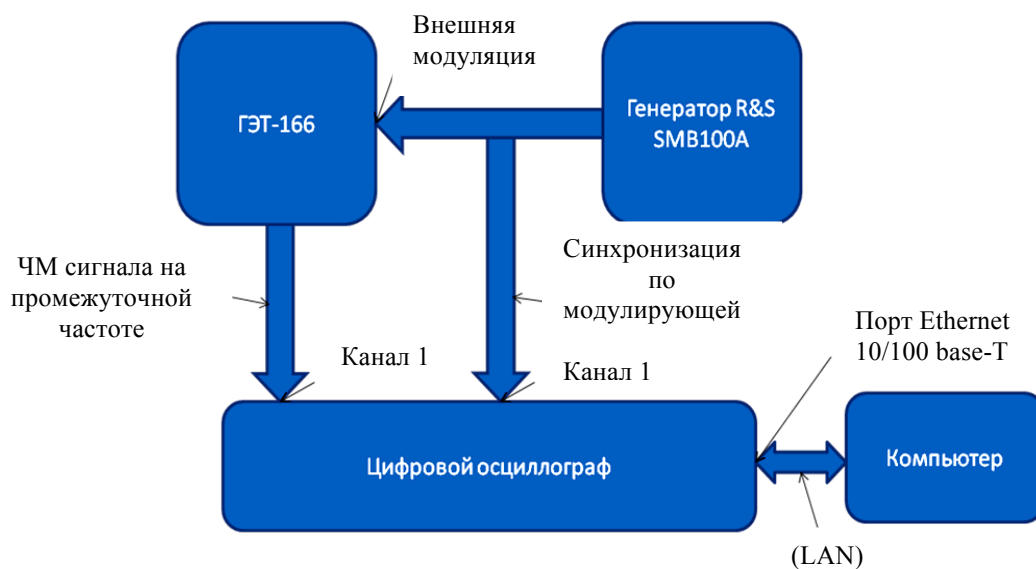


Рис. 3. Блок-схема для измерения девиации на промежуточной частоте

Если при реализации метода экстремальных значений периода ЧМ сигнала с помощью частотомера ЧЗ-64 в действующем эталоне доминирующей составляющей погрешности являлась дискретность отсчета (1 нс), то с применением быстродействующего АЦП осциллографа эта составляющая погрешность пренебрежимо мала. Время проведения измерений тоже существенно уменьшается. Результаты измерения девиации частоты с применением Государственного первичного специального эталона единицы девиации частоты ГЭТ-166 приведены в табл. 7.

Таблица 7

Разница между значением, воспроизводимым калибратором эталона и измеренным значением девиации частоты

Девиация частоты $\Delta f = 1000$ МГц							
Мод. частота F_m , кГц	0,02	0,09	0,4	1	6	20	30
Разница значений девиации частоты Δf , %	0,013	0,008	-0,014	-0,010	-0,015	0,018	-0,017

Из таблицы видно, что сходимость результатов измерений методом электронно-счетного частотомера и методом экстремальных значений периода ЧМ сигнала оказалась лучше, чем в рассмотренном выше случае метода «нулей функции Бесселя».

На модулирующих частотах свыше 30 кГц становится доминирующей методическая погрешность измерения девиации частоты. То есть за время измеряемого периода ~ 1 мкс заметно изменяется отклонение частоты от несущей, достигая своего пикового значения (по определению равного девиации частоты) и затем снова уменьшаясь. При модулирующей частоте 200 кГц методическая погрешность максимальна.

Расчетные значения методической погрешности измерения девиации частоты ~ 1 МГц на промежуточной частоте порядка 10 кГц в диапазоне модулирующих частот от 1 кГц до 200 кГц представлены в таблице 8.

Таблица 8

Девиация частоты $\Delta f = 1$ МГц							
Мод. частота F_m , кГц	1	6	20	30	60	100	200
Методическая погрешность, %	$-3,28 \cdot 10^{-4}$	-0,012	-0,131	-0,296	-1,181	-3,257	-12,649

Методическую погрешность измерения девиации частоты можно существенно снизить, если измерять минимальный и максимальный периоды несущей частоты. Расчетные значения методической погрешности при измерении девиации частоты 1 МГц на несущей частоте 50 МГц не превышают 0,005% в диапазоне модулирующих до 200 кГц. Однако резко возрастает влияние шумовой составляющей погрешности [6]. Вид демодулированного сигнала представлен на рис. 4.

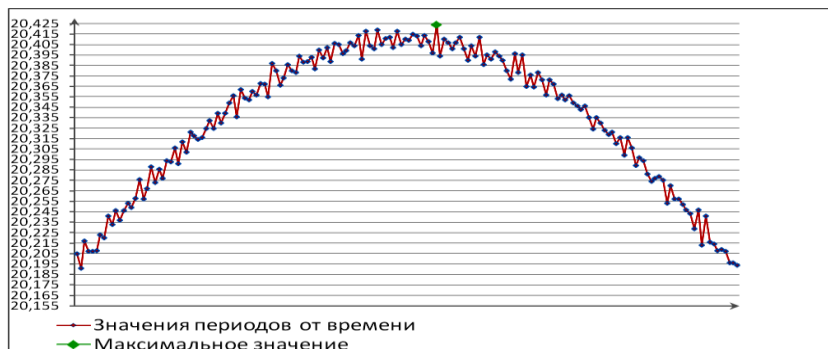


Рис. 4. Демодулированный сигнал несущей частоты 50 МГц, $F_m = 100$ кГц, $\Delta f = 1$ МГц

В отличие от измерителей модуляции и анализаторов спектра с функцией аналогового демодулятора АЦП осциллографа не имеет специальных фильтров для ограничения полосы пропускания сигнала, поэтому и возникает повышенный уровень шума. Шумовая составляющая погрешности измерения девиации частоты методом экстремальных значений обусловлена как характеристиками генератора, так и измерителя.

Для уменьшения влияния шумовой составляющей погрешности производится обработка результатов измерения по разработанной методике. Методика основана на измерении среднеквадратического отклонения (σ) периода сигнала вблизи максимума модулирующей частоты. Вероятностное распределение такого периода из-за шумов принимается нормальным. Вблизи максимума модулирующей частоты, значения периодов имеют примерно одинаковые вероятностные распределения, отличающиеся лишь математическим ожиданием. Однако когда в поле рассмотрения измерительного прибора попадает более одного периода, то ему приходится выбирать из них максимальный (или минимальный). В общем случае максимальный период для идеализированной модели без шумов - T_{max} могут превысить n периодов, которые суммарно с шумом (с его максимальным значением) превышают T_{max} . Сам период T_{max} при этом также суммируется с шумом и может оказаться как больше, так и меньше наибольшего из n периодов. Осциллограф в режиме «WaveScan» выбирает по программе наибольший и увеличивает свои показания. В результате возникает смещение математического ожидания вероятностного распределения – рис. 5.

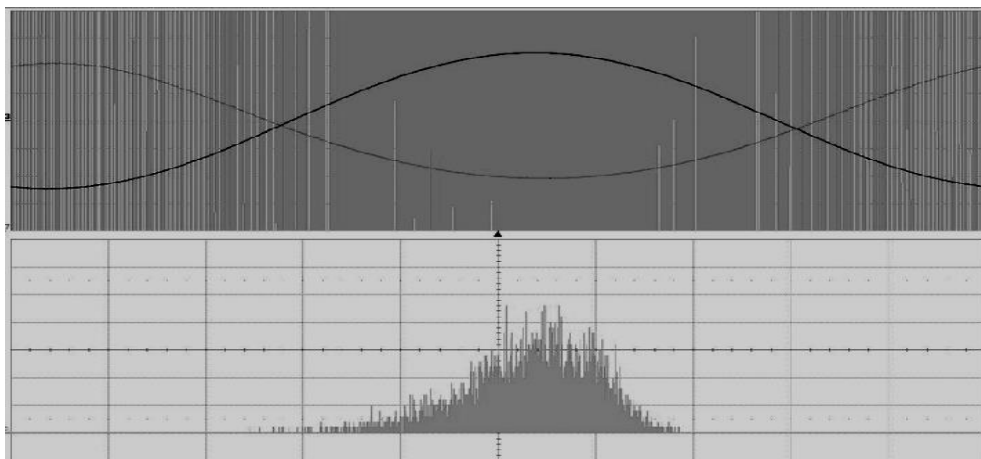


Рис. 5. Смещение (вправо) распределения в режиме «WaveScan»
(изображение на экране осциллографа)

Расчет смещения математического ожидания производится следующим образом. Формируется матрица из теоретических значений математических ожиданий периодов вблизи максимума модулирующей частоты в диапазоне 3σ , также учитывается, что несущая и модулирующая частоты не синхронизированы между собой. Далее строится распределение со смещением:

$$\psi = \sum_{i=1}^n f_i \cdot F_1 \cdot F_2 \cdot \dots \cdot F_{i-1} \cdot F_{i+1} \cdot \dots \cdot F_n, \quad (2)$$

где f_i – плотность вероятности нормального распределения i -го периода, F_i – функция нормального распределения i -го элемента, n – количество рассматриваемых периодов.

Затем вычисляется математическое ожидание получившегося распределения и сравнивается с теоретическим (без шума) значением экстремального периода. В экспериментах смещение математического ожидания на модулирующих частотах 100 – 200 кГц составило $(0,0003, \dots, 0,0007) \cdot T_{\max}$.

Очевидно, что поправка на шумовую погрешность увеличивается при уменьшении измеряемого периода, а также при уменьшении девиации частоты. Кроме того при уменьшении модулирующей частоты увеличивается число n , и поправка на шумовую погрешность также увеличивается.

Оба цифровых метода – прямой цифровой синтез и метод экстремальных значений периода ЧМ сигнала – позволяют с высокой точностью установить размер единицы девиации частоты. Разница $\delta\Delta$ между измеренным методом экстремальных значений периода ЧМ сигнала и установленным методом DDS значением девиации частоты 10 МГц приведена в табл. 9.

Таблица 9

Девияция частоты $\Delta f = 10$ МГц					
Мод. частота F_m , кГц	30	60	100	200	500
$\delta\Delta$, %	0,007	0,002	-0,006	-0,004	0,011

Из таблицы видно, что указанные методы показали наилучшую сходимость результатов установления размера единицы девиации частоты.

Состав совершенствуемого эталона был выбран в ходе проведенных исследований и представлен в табл.10, где указаны также основные функции составных частей эталона. Данный состав позволяет сохранить все характеристики действующего эталона и расширить его функциональные возможности.

Таблица 10

Наименование составной части	Выполняемая функция	Требуемые характеристики
1. Калибратор девиации частоты	Воспроизведение и хранение размера единицы девиации частоты	Несущая f_0 5; 50 МГц Модулирующие частоты 0,02 – 200 кГц Δf от 10 Гц до 1 МГц
2. Калибратор частотной и фазовой модуляции К2-96	Воспроизведение и хранение размера единицы девиации частоты Расширение диапазона несущих частот и значений девиации частоты	Несущая част. f_0 0,1; 1; 5; 10; 50; 100; 250; 500; 1000: 2000; 4000 МГц Модулирующие частоты 0,02 – 200 кГц Δf от 10 Гц до 20 МГц
3. Компаратор девиации частоты	Передача размера единицы девиации частоты	f_0 5; 50 МГц Модулирующие частоты 0,02 – 200 кГц Δf от 10 Гц до 1 МГц
4. Генератор 81160А	Воспроизведение и хранение размера единицы девиации частоты	Несущая f_0 от 0,01 до 250 МГц Δf от 10 Гц до 10 МГц, возможно расширение до 50 МГц
5 Осциллограф цифровой запоминающий WR 625 Zi	Установление размера единицы девиации частоты методом экстремальных значений периода ЧМ сигнала	Δf от 1 МГц до 20 МГц Разрешающая способность 0,1 пс
6. Анализатор спектра FSV-K7	Установление размера единицы девиации частоты методом «нулей функции Бесселя» Расширение диапазона несущих частот до 7 ГГц Контроль гармоник в ЧМ сигнале	Диапазон f_0 от 5 до 7000 МГц Функция измерителя модуляции (компаратора) Δf от 10 Гц до 8 МГц
7. Частотомер электронно-счетный вычислительный ЧЗ-64	Установление размера единицы девиации частоты методом электронно-счетного частотомера Калибровка установок К2-38 при поверке	Диапазон частот от 5 Гц до 1 ГГц
8. ПЭВМ	Управление аппаратурой Обработка и хранение результатов	3,0 ГГц, 80 ГБ Интерфейсы RS-232, USB

Основные характеристики предполагаемого нового эталона представлены в табл. 11.

Таблица 11

Метрологические характеристики		
Наименование	Значения	
Диапазоны:	Действующий ГЭТ	Усовершенствованный
Девииции частоты, кГц	от 0,01 до 1000	от 0,01 до 10 000
Модулирующих частот, кГц	от 0,02 до 200	от 0,02 до 200(500)
Несущих частот, МГц (воспроизведение)	5,0 и 50	от 5 до 250; 500; 1000; 2000; 4000
Несущих частот, МГц (измерение)	от 5 до 1000	от 5 до 7000
НСП, Гц - для модулирующих частот от 20 Гц до 20 кГц	$5 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta f + 20$	$3 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta f + 10$
- для модулирующих частот от 20 кГц до 200 кГц	$1 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta f + 150$	$5 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta f + 45$

Результаты измерения девиации частоты независимыми методами приведены в табл. 12. Экспериментально определялась погрешность генератора ЧМ сигналов 81160А и таким образом определялась погрешность воспроизведения методом прямого цифрового синтеза (реализованного в конкретном генераторе) относительно погрешностей других методов. Именно такое сопоставление результатов измерений является наиболее показательным и выбрано по причине высокой стабильности характеристик генератора, минимального коэффициента гармоник и широкого диапазона воспроизводимых значений единицы девиации частоты (в таблице 12 - до 10 МГц)

В верхней строке ячейки таблицы указана погрешность, определенная действующим эталоном ГЭТ 166-2004. Во второй строке – погрешность, найденная методом нулей функции Бесселя, в нижней – погрешность, найденная методом экстремальных значений периода.

Таблица 12

Частота модуляции F _m , кГц	Погрешность (несущая частота 50 МГц), %, при девиации Δf, кГц				
	10000	1000	500	100	10
0,03		-0,024 - 0,013	0,055	-0,014	0,096
0,09		-0,023 - 0,008	0,060	-0,015	-0,090
0,4		-0,015 - - 0,014	0,079	-0,023	-0,111
1,0		-0,022 - -0,010	0,033	0,020	0,110
6,0	-	-0,023 - - 0,015	0,049	0,013 0,012	-0,059 -0,022
20		-0,029 - 0,018	0,057 0,023	- 0,037 0,006	0,050
30	- - 0,007	-0,041 - - 0,017	-0,032 0,022	-0,106 0,021	-0,178
60	- - 0,002	-0,041 - -	- 0,108 0,021	-0,205 0,021	-0,060
100	- - -0,006	-0,026 0,0010 0,024	-0,077 0,0004	- 0,206	-0,130
200	- - -0,004	0,008 0,020 -	-0,154 0,021	-0,073	0,097

Как видно из таблицы 12, отличия воспроизводимых генератором и измеренных на эталоне ГЭТ 166-2004 значений девиации частоты, как правило, не превышают неисключенной систематической погрешности Государственного эталона. Отличия значений, измеренные методом «нулей функции Бесселя» и методом экстремальных значений частоты, еще в несколько раз меньше.

В ходе исследования возможностей методов и средств измерений с целью усовершенствования Государственного первичного специального эталона единицы девиации частоты были получены следующие результаты.

1. Доказана возможность и необходимость применения метода прямого цифрового синтеза в первичном эталоне единицы девиации частоты.
2. В результате увеличения временного разрешения в 10 000 раз доказана возможность измерения девиации частоты методом экстремальных значений периода на несущей частоте 50 МГц. Это приводит к снижению на два порядка методической погрешности измерения на высоких модулирующих частотах и снижает неисключенную систематическую погрешность.
3. Разработана методика определения смещения математического ожидания результата измерений методом экстремальных значений периода. Расхождение результатов измерений девиации частоты двумя наиболее точными методами не превысило 0,007 %.
4. Точность измерений подтверждена 4-мя независимыми методами измерений, для которых расхождение не превысило 0,024 %.
5. Диапазон значений девиации частоты расширен вверх в 10 раз с сохранением точности измерений.
6. Диапазон несущих частот расширен в 7 раз.
7. Имеется возможность расширения диапазона модулирующих частот в 10 раз - до 1 МГц.

Литература

1. Мыльников А.В. Результаты сличений рабочих эталонов девиации частоты //Измерительная техника, 2003, № 6, с. 56-58.
2. Болмусов Ю.Д., Мартынов В.А., Скворцов Е.Л., Куваева Н.В. Эталон единицы коэффициента амплитудной модуляции высокочастотных колебаний// Метрология и измерительная техника в связи, 2004, № 2, с. 24 – 27.
3. Мыльников А.В., Тищенко В.А. Государственный первичный эталон единицы коэффициента амплитудной модуляции высокочастотных колебаний // Измерительная техника, 2012, № 1, с. 10 - 14.
4. Мыльников А.В. Цифровые методы измерения и синтеза АМ и ЧМ сигналов в эталонных средствах измерений // Тезисы доклада на IX научно-технической конференции «Метрология в радиоэлектронике», Москва, 17-19 июня 2014 г., с. 229-231.
5. Мыльников А.В., Пивак А.В. Калибратор амплитудно- и частотно-модулированных сигналов на базе векторного генератора // Измерительная техника, 2014, № 4, с. 37-40.
6. Могилев И.В., Мыльников А.В. Экспериментальное исследование метода измерения экстремальных значений периода ЧМ сигнала с применением высокоскоростных АЦП // Тезисы доклада на IX научно-технической конференции «Метрология в радиоэлектронике», Москва, 17-19 июня 2014 г, с. 238-240.